

А. И. Морозова*, А. Н. Беляков

НИУ «Белгородский государственный университет», г. Белгород

**morozova_ai@bsu.edu.ru,*

Научный руководитель – проф., д-р физ.-мат. наук *А.Н. Беляков*

ФРАГМЕНТАЦИЯ И УПРОЧНЕНИЕ МЕДНОГО СПЛАВА Cu–0,1Cr–0,06Zr, ПОДВЕРГНУТОГО РАВНОКАНАЛЬНОМУ УГЛОВОМУ ПРЕССОВАНИЮ

Исследована эволюция микроструктуры и механические свойства сплава Cu–0,1 % Cr–0,06 % Zr после равноканального углового прессования (РКУП) при температуре 400 °С. Установлено, что РКУП приводит к уменьшению среднего размера зерен до субмикроструктурного состояния после 12 проходов. Оценка вкладов зернограницного, дислокационного и дисперсионного упрочнения в общее упрочнение проводилась с использованием модифицированного соотношения Холла-Петча. Основной вклад вносит дислокационное упрочнение, которое резко возрастает после 1 прохода РКУП до 200 МПа и почти не меняется с увеличением степени деформации.

Ключевые слова: хромоциркониевая бронза, фрагментация, равноканальное угловое прессование, механические свойства, упрочнение.

A. I. Morozova, A. N. Belyakov

GRAIN REFINEMENT AND STRENGTHENING OF A Cu–0.1Cr–0.6Zr ALLOY SUBJECTED TO EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING

The microstructure evolution and mechanical properties of a Cu–0.1Cr–0.06Zr alloy subjected to equal channel angular pressing (ECAP) at temperature 400 °C were examined. The ECAP processing resulted in gradual decrease of grain size below 1 μm after 12 ECAP passes. The main contribution to the strengthening during ECAP processing was provided by the dislocation density, which increased to 200 MPa after the first ECAP pass and did not vary remarkably with further straining.

Keywords: Cu–Cr–Zr alloy, grain refinement, equal channel angular pressing, mechanical properties, strengthening.

Равноканальное угловое прессование является одним из наиболее эффективных методов фрагментации структуры и увеличения прочностных свойств. Обычно изменение предела текучести связывают с изменением размера зерна в соответствии с законом Холла-Петча [1]. Для

деформированных материалов используют иной подход к описанию упрочнения, связывающий рост прочностных характеристик с увеличением плотности дислокаций [2]. Автор работы [3] объединяет два этих подхода и обсуждает изменение предела текучести в сильно деформированных материалах в рамках модифицированного уравнения Холла-Петча, которое учитывает зернограничное и дислокационное упрочнение. Целью настоящей работы являлось определение оптимального подхода для оценки вкладов дислокационного и зернограничного упрочнения в общее упрочнение низколегированной бронзы системы Cu–Cr–Zr.

В качестве материала исследования был выбран низколегированный медный сплав следующего химического состава: Cu–0,096 % Cr–0,057 % Zr (мас. %), подвергнутый равноканальному угловому прессованию (РКУП) при температуре 400 °С до истинных степеней деформации $\varepsilon \sim 1, 2, 4, 8, 12$. Перед деформацией сплав был отожжен при температуре 920 °С в течение 1 ч, закален и состарен при температуре 550 °С, 4 ч. После данной термообработки в структуре сплава наблюдались упрочняющие частицы Cr со средним размером 20 нм.

Микроструктура бронзы после интенсивной пластической деформации показана на рис. 1. При небольших степенях деформации происходит образование большого числа малоугловых границ (МУГ), разделяющих исходные зерна, резко увеличивается плотность дислокаций (рис. 2, а). С увеличением степени деформации разориентировка субграниц растет и МУГ трансформируются в большеугловые границы (БУГ) зерен. После истинной степени деформации $\varepsilon \sim 4$ наблюдается значительное измельчение зеренной структуры, которая характеризуется бимодальным распределением структурных элементов: наряду с областями с УМЗ структурой встречаются области, где БУГ еще не сформировались. После истинной степени деформации $\varepsilon \sim 8$ бронза характеризуется высокой долей БУГ (>50 %), средний размер зерен становится меньше 1 мкм, зерна имеют практически равноосную форму. При этом дальнейшая деформация ($\varepsilon \sim 12$) не приводит к значимому изменению среднего размера структурных элементов.

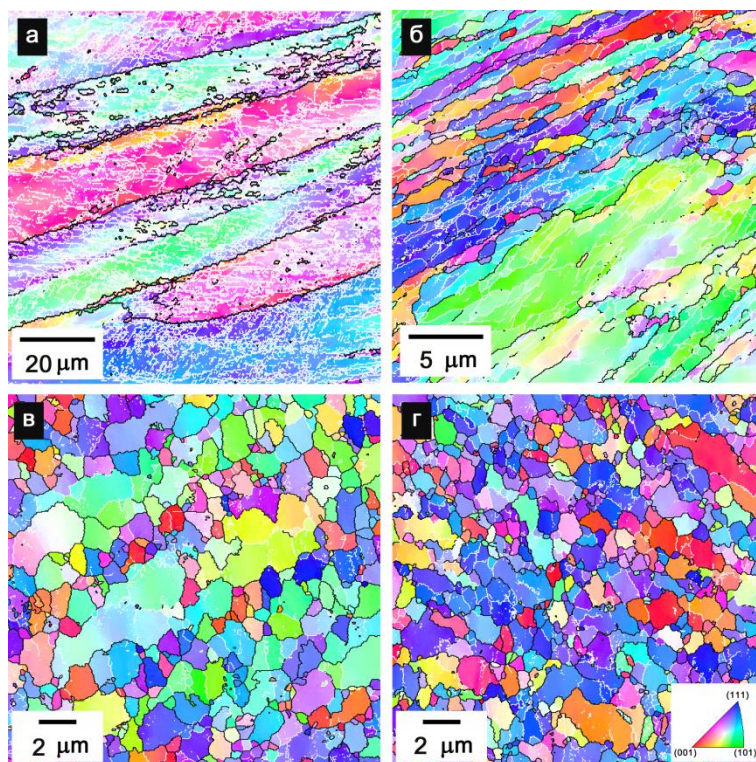


Рис.1. Микроструктура низколегированной бронзы после РКУП до истинной степени деформации: а – $\varepsilon \sim 1$; б – $\varepsilon \sim 4$; в – $\varepsilon \sim 8$; г – $\varepsilon \sim 12$

Фрагментация ведет к повышению прочностных характеристик бронзы (рис. 2, б и в). Уже после 1-го прохода РКУП значительно увеличивается предел текучести и предел прочности, в то же время резко снижается пластичность. После деформации $\varepsilon \sim 8$ предел текучести составляет 390 МПа, предел прочности – 410 МПа. Следует отметить, что при дальнейшей деформации значительного изменения прочностных свойств не происходит.

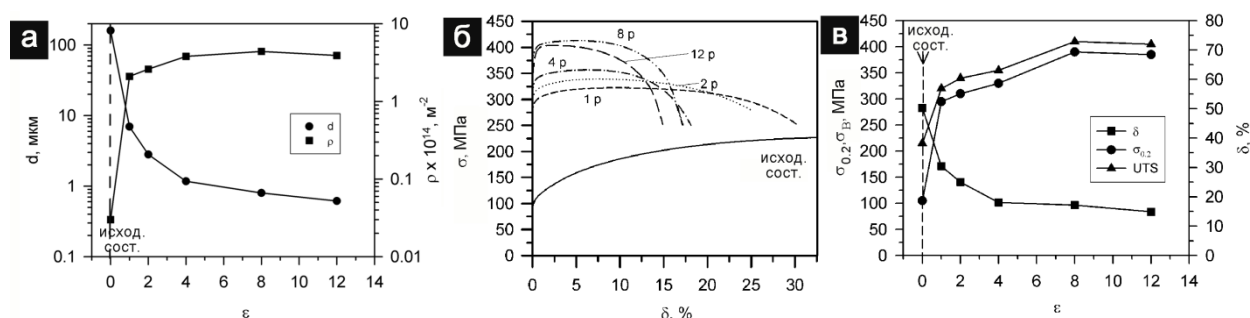


Рис. 2. Влияние интенсивной пластической деформации на средний размер зерен d и плотность дислокаций ρ сплава системы Cu–Cr–Zr – а; кривые напряжение–деформация для медного сплава, подвергнутого РКУП до степени деформации $\varepsilon \sim 1, 2, 4, 8, 12$ – б; предел текучести $\sigma_{0.2}$, предел прочности σ_B и относительное удлинение δ низколегированной бронзы после РКУП до различных степеней деформации ε – в

В рамках традиционного подхода к описанию упрочнения, предложенного Петчем в 1953 году, предел текучести имеет следующую функциональную зависимость от размера зерна [1]:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_0^* + k_y d^{-0,5}, \quad (1)$$

где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести; σ_0^* и k_y – константы; d – средний размер зерен.

Закон Холла-Петча для низколегированного сплава проиллюстрирован на рис. 3, а. Из графика видно, что точки плохо аппроксимируются прямой линией. Коэффициент детерминации R , определяющий сходимость экспериментальных данных и аппроксимирующей прямой, равен 0,92. Значение σ_0^* , включающее дисперсионное упрочнение и напряжения Пайерлса-Набарро (25 МПа), завышено и составляет 165 МПа.

Дислокационное упрочнение описывается соотношением Тейлора [2]:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_0^{**} + \alpha G b \rho^{0,5}, \quad (2)$$

где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести; σ_0^* , α , G , b , – константы; ρ – плотность дислокаций. Влияние дислокационного упрочнения на предел текучести показано на рис. 3, б. Экспериментальные данные хорошо коррелируют с рассчитанным дислокационным упрочнением, что подтверждается высоким значением коэффициента детерминации $R = 0,98$. Коэффициент $\alpha = 0,40$ имеет необычное для медных сплавов высокое значение.

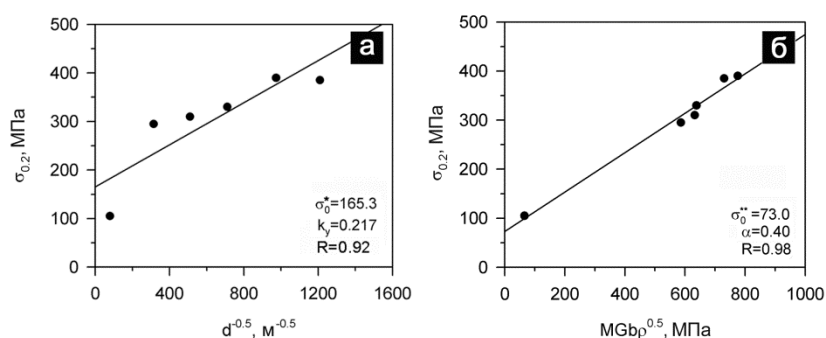


Рис. 3. Соотношение Холла-Петча для низколегированной бронзы, подвергнутой РКУП – а; влияние дислокационного упрочнения на предел текучести в низколегированной бронзе после РКУП – б

Анализ упрочнения с использованием модифицированного уравнения Холла-Петча учитывает как дислокационное, так и зернограницное упрочнение [3]:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_0 + k_y d^{-0,5} + \alpha G b \rho^{0,5}, \quad (3)$$

В рамках данного приближения наблюдается наилучшая сходимость экспериментальных и теоретических результатов (рис. 4, а). Коэффициент детерминации R равен 0,99. Экспериментальные данные хорошо аппроксимируются плоскостью со следующими параметрами: $\sigma_{0,2} = 79 + 0,05d^{-0,5} + 0,33MGb\rho^{0,5}$. Из уравнения видно, что изменение размера зерна с увеличением степени деформации несущественно влияет на значение предела текучести ($k_y = 0,05 \text{ МПа} \times \text{м}^{0,5}$).

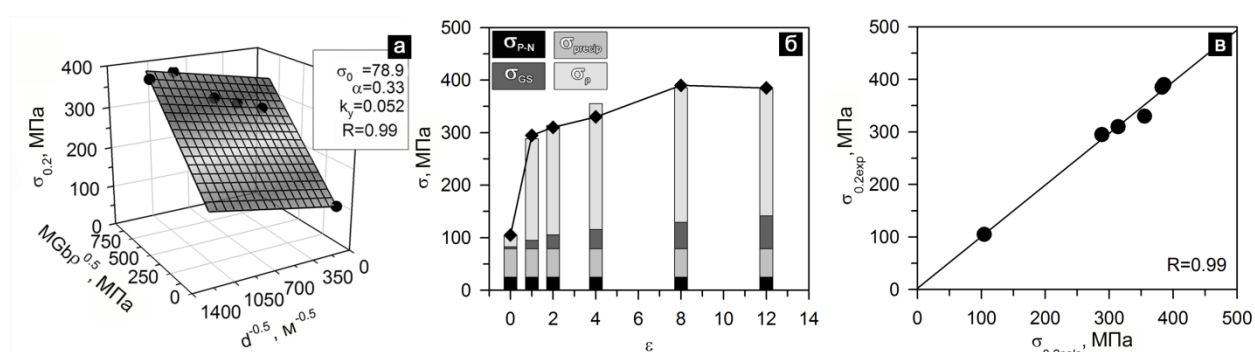


Рис. 4. Модифицированное соотношение Холла-Петча для бронзы – а; дислокационное, зернограничное и дисперсионное упрочнение в зависимости от степени деформации РКУП – б; корреляция экспериментальных и рассчитанных данных – в

Расчет вкладов упрочнений (рис. 4, б) показывает, что основной вклад в упрочнение медного низколегированного сплава вносят внутризеренные дислокации. После 1 прохода дислокационное упрочнение резко возрастает до 200 МПа и незначительно изменяется с ростом деформации. Вклад от зернограничного упрочнения растет постепенно с увеличением степени деформации, после 12 проходов РКУП зернограничное упрочнение составляет 63 МПа. Дисперсионное упрочнение, рассчитанное графическим способом, принято равным 54 МПа вне зависимости от степени деформации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (грант № 14.Y31.16.8446-НШ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Petch N. J. The cleavage strength of polycrystals // Journal of Iron and Steel Research. 1953. V. 174. P. 25–31.
2. Taylor G. I. The mechanism of plastic deformation of crystals. Part I. Theoretical // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. 1934. P. 362–387.
3. Hansen N. Hall–Petch relation and boundary // Scripta Materialia. 2004. V. 51. P. 801–806.